

Post-tensioned timber frame structures

Doctoral Thesis**Author(s):**

Wanninger, Flavio

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010532970>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

POST-TENSIONED TIMBER FRAME STRUCTURES

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Flavio Wanninger

MSc ETH Civil Eng

born on 31.01.1984

citizen of

Davos GR & Klosters GR

accepted on the recommendation of

Prof.Dr. Andrea Frangi (ETH Zurich, Examiner)

Prof.Dr. Massimo Fragiaco (University of Sassari, Co-examiner)

Prof.Dr. Božidar Stojadinović (ETH Zurich, Co-examiner)

Abstract

Simple and economical moment-resisting connections are difficult to realize in timber engineering. These kinds of connections are often built using steel elements and are therefore expensive. A solution may be provided with post-tensioned timber joints. A research program was launched in 2004 at the University of Canterbury, New Zealand, with the aim to adapt post-tensioned connections for timber. Post-tensioned timber joints have also been studied at the Institute of Structural Engineering at the ETH in Zurich. An innovative post-tensioned beam-column timber joint has been developed using glued laminated timber with local hardwood reinforcement. No further steel elements are required for the moment-resisting timber joint, only a single straight tendon is placed in a cavity in the middle of the beam. The developed joint is characterised by a high degree of pre-fabrication and easy assembly on site. The system shows great potential for timber frame structures and multi-storey buildings. This thesis investigates the structural behaviour of the post-tensioned timber connection that was developed at the ETH in Zurich.

Robust design criteria and analytical models are fundamental for a successful market implementation of the proposed system. A simplified analytical model was developed in order to predict the structural behaviour of the post-tensioned timber connection. The model is based solely on the stiffness properties of the column and the geometrical properties of the joint. The model predictions are in good agreement with the experimental results for tendon forces over 500 kN or initial compression stresses corresponding to 2 MPa. In case of lower tendon forces, however, the model predicts a too stiff behaviour.

The moment-rotation-behaviour of a post-tensioned beam-column timber joint was analysed extensively with a series of static bending tests. The timber joint was loaded at the end of the beams in order to apply a moment to the connection. The tests were conducted with various tendon forces, from 300 kN up to 700 kN. The bending tests were performed with a controlled load level so that no failure perpendicular to the grain in the column occurred. The maximal allowable vertical load to be applied was estimated using the analytical model. A final bending test was conducted in order to study the failure mode of the post-tensioned timber joint. The vertical load on the beams was increased until the tendon elongation got so high that the test had to be aborted for safety reasons. The tests showed a self-centering behaviour of the proposed joint which was able to withstand all applied load cases without any severe damage.

A post-tensioned timber frame was analysed with a series of pushover-tests. The frame was loaded horizontally while the displacement was recorded. The tests were conducted with various tendon forces, from 300 kN up to 700 kN to determine the influence of the tendon force on the horizontal stiffness of the frame. All tests were performed with a controlled load level, which was estimated using the analytical model. The frame showed a self-centering behaviour without any noticeable damage. The pushover-curves were in the expected range of the model predictions. Moreover, the analytical model was able to predict the structural behaviour of

the connections accurately. This could be verified by analysing the position of several LEDs attached to the connections.

A numerical model using OpenSees was developed in order to obtain a second tool to predict the structural behaviour of the proposed system. The model could verify the results obtained from the analytical approach and is therefore able to predict the behaviour of post-tensioned timber connections well. In addition to the analytical model, the OpenSees model shows a reduction in stiffness as the tendon force gets smaller, i.e. the numerical model can also be used for low tendon forces. However, the numerical model requires more input parameters than the analytical model which may be difficult to estimate accurately. Nevertheless, the numerical model provides a second independent tool which can be used for the design of post-tensioned timber structures.

Tests regarding the long-term behaviour of post-tensioned timber connections have been performed for the duration of two years up to date and will continue for at least one more year. The aim of these tests is to estimate the loss in tendon force that has to be expected during the life-time of a structure. Several post-tensioned beam and beam-column timber specimens exposed to controlled and uncontrolled environmental conditions and loaded only with the axial prestressing force have been monitored. The force in the tendon is measured together with the strains in the specimens as well as the temperature and relative humidity in the testing environment. The tests showed that the specimens in the uncontrolled environment suffered more losses than the ones in the controlled environment. The additional losses are due to mechano-sorptive strains, which occur in loaded specimens in combination with a change in moisture content. Furthermore, creep tests were performed on small glulam timber blocks loaded in compression. The estimated creep coefficients parallel and perpendicular to the grain are used to calculate the tendon force losses with an analytical model for the larger post-tensioned specimens. The model is also used to estimate the benefit of reinforcing the column with hardwood in the connection region. Based on the model predictions and the extrapolated tendon force losses of the post-tensioned specimens a 30% loss in tendon force should be accounted for in the design process.

The moment-rotation behaviour of the post-tensioned timber connection was implemented in an OpenSees model using a tri-linear rotational spring in order to design a post-tensioned timber structure. The design process showed that neither the gravity loads nor the seismic load are the controlling design criteria. The design is rather controlled by the lateral deformations due to wind. Based on this finding it is recommended to focus further research in increasing the connection stiffness or add additional structural elements before continuing with investigations on the seismic design.

Kurzfassung

Die Umsetzung von wirtschaftlich biegesteifen Verbindungen ist im Holzbau schwer zu realisieren. Diese Art von Verbindungen benötigen oft Stahlelemente und sind daher teuer. Ein Lösungsansatz kann die Verwendung von vorgespannten Holzverbindungen sein. Ein Forschungsprogramm wurde im Jahr 2004 an der Universität von Canterbury gestartet, um die Entwicklung von duktilen vorgespannten Verbindungen für Holztragwerke voranzutreiben. Diese vorgespannten Holzrahmen können auf der Baustelle schnell montiert werden und sind daher auch aus wirtschaftlicher Sicht interessant. Am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Häring & Co. AG der Prototyp einer neuartigen vorgespannten Holzrahmenkonstruktion entwickelt. Diese Arbeit befasst sich mit dem an der ETH entwickelten System.

Für eine erfolgreiche Markteinführung des vorgeschlagenen Systems benötigt es Bemessungsgrundlagen, welche von Ingenieuren in der Praxis angewendet werden können. Ein einfaches Berechnungsmodell wurde entwickelt, um das Tragverhalten der vorgespannten Holzverbindung vorherzusagen. Das Modell basiert auf Federn und benötigt lediglich die Steifigkeitseigenschaften der Stütze sowie die geometrischen Eigenschaften des Anschlusses als Eingabeparameter. Die Modellvorhersagen stimmen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, allerdings lediglich für Vorspannkkräfte über 500 kN, was einer initialen Druckspannung von 2 MPa entspricht. Das Modell überschätzt die Steifigkeiten des Anschlusses bei kleineren Vorspannkkräften.

Das Momenten-Rotationsverhalten eines vorgespannten Knotens wurde ausgiebig mit einer Reihe von statischen Versuchen analysiert. Die Trägerenden wurden vertikal belastet um ein Moment in der Verbindung zu erzeugen. Die Versuche wurden unter verschiedenen Vorspannkkräften von 300 kN bis zu 700 kN durchgeführt. Die Biegeversuche wurden unter einem kontrollierten Lastniveau durchgeführt, so dass kein Versagen im Knotenbereich eintreten konnte. Die maximal zulässige Last wurde mit dem analytischen Modell berechnet. Ein letzter Belastungsversuch wurde durchgeführt, um ein Versagen des vorgespannten Knotens herbeizuführen. Die vertikale Belastung wurde erhöht, bis der Zuwachs in der Vorspannkraft so hoch wurde, dass der Versuch aus Sicherheitsüberlegungen abgebrochen werden musste. Die Versuche zeigten ein selbstzentrierendes Verhalten des Knoten, welcher sämtliche Lastfälle ohne nennenswerte Schäden überstand.

Weitere Versuche wurden an einem vorgespannten Rahmen vorgenommen, welcher horizontal belastet wurde (Pushover-Versuche). Die Versuche wurden ebenfalls mit verschiedenen Vorspannkkräften von 300 kN bis zu 700 kN durchgeführt, um zu prüfen, wie die Vorspannkraft die horizontale Steifigkeit des Rahmens beeinflusst. Alle Versuche wurden mit einem kontrollierten Belastungsniveau durchgeführt, welches unter Verwendung des analytischen Modells berechnet wurde. Der Rahmen zeigte ein selbstzentrierendes Verhalten ohne grosse Schäden bei dem kontrollierten Lastniveau. Das Verhalten des Rahmens konnte gut mit dem analytischen Modell

vorgehrgesagt werden. Darüber hinaus war das analytische Modell in der Lage, das strukturelle Verhalten der Anschlüsse vorherzusagen, welches durch die Analyse der Position mehrerer LEDs an den einzelnen Anschlüssen verifiziert werden konnte.

Ein numerisches Modell wurde entwickelt um eine zweite unabhängige Alternative für die Vorhersage des strukturellen Verhaltens von vorgespannten Knoten zur Verfügung zu stellen. Dieses numerische Modell konnte mit den experimentellen Ergebnissen verifiziert werden und stimmt daher auch mit dem analytischen Modell weitgehend überein. Zudem ist das numerische Modell, im Gegensatz zum analytischen Modell, in der Lage, das Knotenverhalten bei niedrigen Vorspannkraften vorherzusagen. Es benötigt jedoch mehr Eingabeparameter als beim analytischen Ansatz, wie beispielsweise die Querdehnnzahlen, dessen korrekte Ermittlung schwierig ist. Dennoch stellt das numerische Modell ein zweites Bemessungswerkzeug dar, welches für die Modellierung von vorgespannten Holzrahmen verwendet werden kann.

Um die Spannkraftverluste für Holzrahmenkonstruktionen zu schätzen, wurden Versuche an vorgespannten Verbindungen und Trägern durchgeführt. Die Versuche liefen bis dato für zwei Jahre und werden noch für mindestens ein Jahr fortgeführt. Mehrere vorgespannte Träger und Knoten wurden in kontrollierten und unkontrollierten Umweltbedingungen geprüft, wobei die Vorspannkraft kontinuierlich gemessen wurde. Die Versuche zeigten, dass die Körper in den unkontrollierten Bedingungen grössere Spannkraftverluste aufweisen als die Körper in den kontrollierten Bedingungen. Der Unterschied konnte mit dem Auftreten von mechano-sorptiven Dehnungen erklärt werden, welche bei belasteten Proben auftreten, welche gleichzeitig eine Feuchteänderung erfahren. Parallel wurden Kriechversuche an kleinen BSH-Elementen durchgeführt um die Kriechzahlen zu bestimmen. Diese wurden für ein analytisches Modell verwendet um die Spannkraftverluste zu berechnen. Auf der Grundlage der Modellvorhersagen und den extrapolierten Verlusten der vorgespannten Proben sollten 30% Spannkraftverlust für die Bemessung berücksichtigt werden.

Das mit dem analytischen Modell ermittelte Momenten-Rotationsverhalten des Anschlusses wurde in ein OpenSees-Modell implementiert. Dazu wurde der Anschluss mit einer tri-linearen Rotationsfeder modelliert. Dieses Modell wurde für die überschlägige Bemessung eines fiktiven Gebäudes verwendet. Diese Bemessung zeigt, dass weder die Schwerlasten noch die Erdbebenlasten massgebend sind, sondern die horizontalen Verformungen unter Windbeanspruchung. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten sich daher auf die Aussteifung des Systems konzentrieren bevor das Verhalten unter Erdbeben genauer untersucht wird.